บทที่ 4

การก่อสร้างและโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยเครื่องขุดเจาะที่ศึกษา

เพื่อให้ทราบกระบวนการก่อสร้างและการดำเนินงานของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ศึกษา สำหรับใช้ในการระบุปัจจัยเสี่ยงต่อไป ในบทนี้จึงกล่าวถึงเทคนิคและวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยเครื่องขุดเจาะ (TBM) ระบบสมดุลแรงดันดิน (EPB) รวมทั้งรายละเอียดทั่วไปของโครงการกรณีศึกษา อันได้แก่ รูปแบบของระบบการจัดทำและส่งมอบโครงการ และรูปแบบการเบิกจ่ายเงิน โดยโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่คัดเลือกมาศึกษาเป็นโครงการในความรับผิดชอบของ 3 หน่วยงานของภาครัฐ คือ สำนักการระบายน้ำ สังกัดกรุงเทพมหานคร การประปานครหลวง และการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งเป็นหน่วยงานหลักที่ดำเนินการขุดเจาะอุโมงค์ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

4.1 การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยเครื่องขุดเจาะระบบสมดุลแรงดันดิน

ปัจจุบันเทคนิคการขุดเจาะอุโมงค์ได้มีการพัฒนาเป็นอย่างมาก โดยใช้เครื่องจักรกลที่มีเทคโนโลยีทันสมัยและสมรรถนะสูง โดยเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ หรือ Tunnel Boring Machine (TBM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ขุดเจาะในดินหรือหินที่มีความแข็งแรงพอสมควร สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในกรุงเทพมหานครด้วยเครื่องขุดเจาะเริ่มเข้ามาดำเนินการก่อสร้างตั้งแต่ปี พ.ศ. 2519 ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง โดยใช้หัวเจาะอุโมงค์ประเภทเปิดหน้าดิน Semi Mechanical Shield (Open Type Shield) แต่จากประสบการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ในกรุงเทพมหานครที่ผ่านมาทำให้ทราบปัญหาของการใช้หัวเจาะประเภทเปิดหน้าดินที่มีขีดจำกัด ซึ่งไม่เหมาะสมกับการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีสภาพชั้นดินหลายประเภทดังเช่นพื้นที่ของกรุงเทพมหานคร ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาระบบค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ของเครื่องขุดเจาะที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ ระบบสมดุลแรงดันดิน หรือที่เรียกว่า Earth Pressure Balance Shield (EPB) ซึ่งเป็นหัวเจาะที่นิยมใช้ในงานอุโมงค์ที่มีสภาพชั้นดินหลายประเภท ทั้งชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) ดินเหนียวแข็งชั้นแรก (First Stiff Clay) และชั้นทรายหรือในชั้นดินที่มีระดับน้ำใต้ดินสูงของกรุงเทพมหานคร

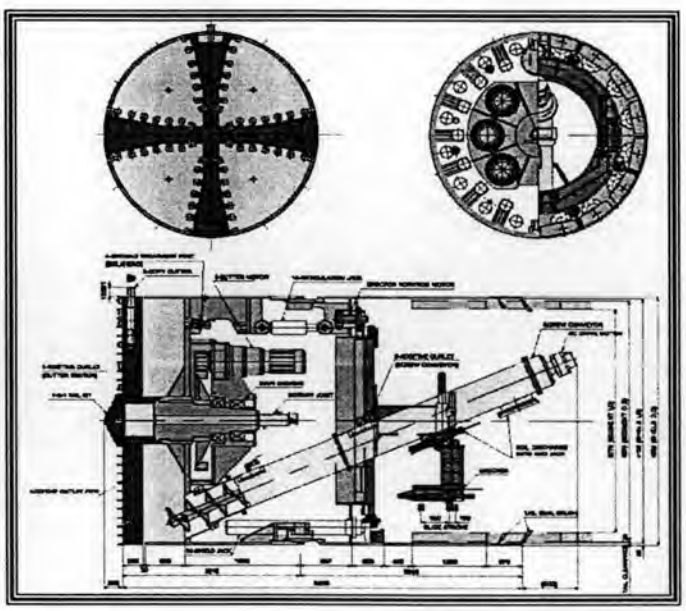
เครื่องขุดเจาะอุโมงค์ระบบสมดุลแรงดันดินเป็นการขุดเจาะอุโมงค์ที่ราคาก่อสร้างไม่สูง ไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงต่อผู้ปฏิบัติงานเนื่องจากแรงดันอากาศ ดังเช่นกรณีของระบบ Compressed Air สามารถรักษาเสถียรภาพของดินข้างหน้าหัวเจาะได้ดี ทำให้ความเสี่ยงในการพังทลายของดินหน้าหัวเจาะลดลง อัตราการขุดเจาะดินสามารถทำได้เร็วกว่าระบบอื่น ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ที่ 2-3 ซ.ม./นาที

และในดินเหนียวอ่อนอาจจะสูงถึง 15 ซ.ม./นาที รวมทั้งเป็นการขุดเจาะอุโมงค์ที่ใช้พื้นที่ทำงานค่อนข้างน้อยจึงเหมาะสมกับบริเวณที่มีสถานที่คับแคบหรือบริเวณชุมชนหนาแน่นในตัวเมือง ดังนั้นหัวเจาะอุโมงค์ประเภทนี้จึงถูกคัดเลือกนำมาใช้ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ต่างๆ ทั้งอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน อุโมงค์ระบายน้ำ อุโมงค์ส่งน้ำประปา และอุโมงค์สายส่งไฟฟ้า

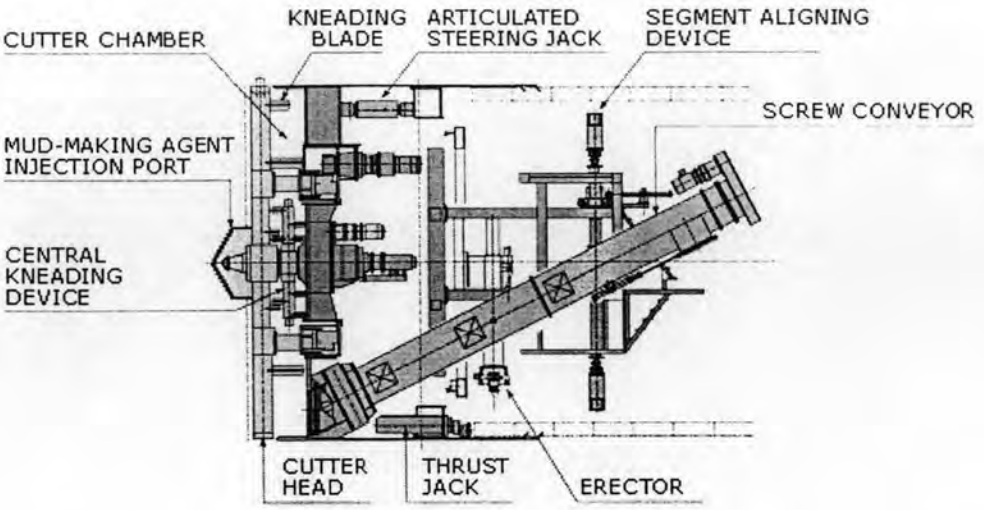
หลักการทำงานของเครื่องขุดเจาะระบบสมดุลแรงดันดินจะใช้แรงดันจากการขุดเจาะเป็นตัวเพิ่มเสถียรภาพของดินบริเวณด้านหน้าหัวเจาะไม่ให้พังทลาย โดยควบคุมแรงดันดินด้านหน้า (Face Pressure) และในห้องพักดิน (Soil Chamber) ให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันดินธรรมชาติและแรงดันน้ำใต้ดินที่หน้าหัวเจาะให้เกิดความสมดุลของแรงดันดินภายในหัวเจาะและด้านหน้าหัวเจาะไม่ให้ดินพังเข้ามาในห้องพักดินมากเกินไปจนทำให้เกิดการทรุดตัวและพังทลาย โดยปรับค่าความเร็วของการลำเลียงดินในสกรูลำเลียงดิน (Screw Conveyor) แรงดันของหัวเจาะจากชุดแม่แรง (Thrust Jacks) และความเร็วในการขับเคลื่อนหัวเจาะให้สัมพันธ์กัน หลักการพื้นฐานในการควบคุมการขุดเจาะที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสามารถทำได้ด้วยการควบคุมให้ปริมาณดินที่ขุดเจาะ (Excavated Soil) เท่ากับปริมาณดินที่ปล่อยออก (Discharge Soil)

4.1.1 เครื่องขุดเจาะระบบสมดุลแรงดันดิน

ลักษณะของเครื่องขุดเจาะระบบสมดุลแรงดันดินเป็นหัวเจาะแบบปิดหน้าเพื่อป้องกันการพังทลายของหน้าดิน ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องขุดเจาะประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก มีรายละเอียดดังนี้ (กีรติ เมืองแสน, 2544)



รูปที่ 4.1 ลักษณะเครื่องขุดเจาะระบบสมดุลแรงดันดิน (ที่มา: มานิต ปานเอม, 2549)



รูปที่ 4.2 รายละเอียดเครื่องขุดเจาะระบบสมดุลแรงดันดิน (ที่มา: มานิต ปานเอม, 2549)

1) Front Body เป็นส่วนที่อยู่ด้านหน้าของเครื่องขุดเจาะ ประกอบด้วย

(1) หัวเจาะอุโมงค์หรือหัวตัดดิน (Cutter Head) เป็นส่วนที่อยู่หน้าสุดของเครื่องขุดเจาะ มีลักษณะเป็นแฉกโดยมี Cutting Teeth ที่สามารถกัดหรือเฉือนดินที่ด้านหน้าหัวเจาะได้ มีความแข็งแรงสูงและสามารถต้านทานแรงดันที่เกิดขึ้นมากๆ ได้ โดยชนิดของฟันที่ใช้จะขึ้นอยู่กับลักษณะดินที่ขุดเจาะ

(2) ฟันกัดดิน (Copy Cutter) ที่ด้านบนหัวเจาะอุโมงค์ คือ ฟันที่สามารถยืดตัวออกทางด้านรัศมีเพื่อเพิ่มการกัดหน้าดินให้เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น ช่วยให้หัวเจาะสามารถเลี้ยวตัวได้มากขึ้นซึ่งทำให้เกิด Tail Voids เนื่องจาก Over Cutting และ Pitching Angel

(3) Drive Unit เป็นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่เรียกว่า Cutter Drive Motor ทำให้หัวเจาะอุโมงค์หมุนเพื่อขุดเจาะดิน

(4) ห้องพักดิน (Soil Chamber) เป็นห้องพักของดินที่ถูกขุดอยู่ต่อจาก Cutter Head ซึ่งดินที่บริเวณด้านหน้าของหัวเจาะจะถูก Cutter Head กัดแล้วเข้ามาทางช่องที่ด้านล่างของ Cutter Head และถูกเก็บไว้ใน Soil Chamber ก่อนที่จะถูกลำเลียงออกไปโดย Screw Conveyor และสายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor) นอกจากนี้ภายใน Soil Chamber จะมีอุปกรณ์วัดแรงดัน (Pressure Sensor) เพื่อวัดความดันของดินและปรับความดันอย่างอัตโนมัติให้ความดันทั้งด้านในหัวเจาะและด้านหน้าหัวเจาะมีความสมดุลกัน

(5) สกรูลำเลียงดิน (Screw Conveyor) เป็นส่วนที่ติดตั้งอยู่ด้านล่างของหัวเจาะต่อจาก Soil Chamber โดยดินใน Soil Chamber จะถูกลำเลียงออกจากส่วนหน้าของหัวเจาะไปยัง

ส่วนท้ายโดยการหมุนของ Screw Conveyor ที่มีลักษณะคล้ายใบพัดเรือยนต์ ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อนำดินขึ้นไปที่ประตูปิด-เปิดด้วยระบบไฮดรอลิคที่ช่วยควบคุมปริมาณการเคลื่อนตัวของดิน

2) Middle Body เป็นส่วนขับเคลื่อนเพื่อดันเครื่องขุดเจาะไปข้างหน้า ประกอบด้วย

(1) ปลอกเหล็ก (Shield) เป็นปลอกเหล็กทรงกระบอก ทำหน้าที่เป็นตัวค้ำยันชั่วคราวขณะขุดดินเพื่อมิให้ดินพังลงมาก่อนที่จะติดตั้งคาดผนังอุโมงค์ (Tunnel Segments)

(2) แขนไฮดรอลิค หรือ ชุดแม่แรง (Hydraulic Jack หรือ Thrust Jacks) จะออกแรงดันเป็นคู่โดยอาศัยคาดผนังอุโมงค์ที่ติดตั้งแล้วเป็นตัวรับแรงให้หัวเจาะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า สามารถบังคับทิศทางของหัวเจาะให้เป็นไปตามแนวที่ออกแบบทั้งด้านซ้าย-ขวา หรือ ขึ้นบน-ลงล่าง โดยกำหนดรูปแบบการดันของ Thrust Jack ให้มีช่วงการดันในแต่ละครั้งเพียงพอสำหรับติดตั้งคาดผนังอุโมงค์

(3) ระบบบังคับทิศทางเครื่องเจาะอุโมงค์ (Articulated Steering System) คือ ส่วนของหัวเจาะที่สามารถหักงอกลางลำตัวได้ เพื่อลดรัศมีความโค้งของอุโมงค์ในแนวโค้งที่มีรัศมีน้อยๆ

(4) เครื่องติดตั้งคาดผนังอุโมงค์ (Segment Erection) เป็นระบบไฮดรอลิคสำหรับติดตั้งคาดผนังอุโมงค์แต่ละชิ้นให้ประกอบจนครบวง

3) Rear Body หรือ ส่วนท้าย เป็นส่วนที่รองรับคาดผนังอุโมงค์ที่ประกอบเสร็จแล้วและกำลังประกอบก่อนที่หัวเจาะจะเคลื่อนตัวไปข้างหน้า จนกระทั่งคาดผนังอุโมงค์ที่ประกอบเสร็จแล้วหลุดจากผิวปลอกเหล็ก (Shield Skin) ของหัวเจาะ โดยมีแปรงขดลวด (Wire Brush Tail Seal) ติดตั้งอยู่เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการไหลซึมของน้ำและวัสดุ Grout ที่ใช้อุดช่องว่างรอบคาดผนังอุโมงค์ไม่ให้ไหลย้อนกลับเข้ามาในหัวเจาะ โดยที่ Wire Brush Tail Seal มีท่อสำหรับฉีดจาระบีชนิดพิเศษขณะขุดเจาะเพื่อป้องกันน้ำไหลย้อนกลับเข้ามา

4) ระบบสนับสนุนการทำงาน ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

(1) สายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor) ทำหน้าที่นำดินไปใส่ลงในรถขนดิน (Muck Car) เพื่อลำเลียงออกไปสู่ภายนอกอุโมงค์ วางพาดอยู่ระหว่างตู้อุปกรณ์ส่วนท้าย (Back Up Unit) โดยอยู่สูงขึ้นไปที่ด้านบนของอุโมงค์ ความเร็วของการลำเลียงดินจะขึ้นอยู่กับแรงดันดินใน Soil Chamber

(2) อุปกรณ์ลำเลียงคาดผนังอุโมงค์ (Segment Transportation Hoist) ติดตั้งอยู่บริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะ ใช้ลำเลียงคาดผนังอุโมงค์จากรถขนคาดผนังอุโมงค์ (Segment Car)

ไปเก็บไว้ที่เครื่องเก็บชิ้นส่วนซึ่งอยู่ด้านหลังหัวเจาะใกล้กับเครื่องมือประกอบดาดผนังอุโมงค์ (Hydraulic Segment Erector) เพื่อรอการติดตั้งต่อไป

(3) อุปกรณ์ส่วนท้าย (Back Up Unit) ประกอบด้วยตู้ขนาดเล็กประมาณ 8-14 ตู้ อยู่ที่บริเวณด้านหลังหัวเจาะ ติดตั้งขนานเป็นคู่ไปตามความยาวของอุโมงค์ เป็นระบบควบคุมการทำงานของหัวเจาะอุโมงค์ แขนไฮดรอลิค สกรูลำเลียงดิน สายพานลำเลียงดิน และส่วนประกอบอื่นๆ

4.1.2 วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ ประกอบด้วยงานส่วนต่างๆ ดังนี้

4.1.2.1 งานขนส่งและติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ แบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทำงาน

1) งานขนส่งดาดผนังอุโมงค์จากโรงงานผลิตถึงพื้นที่ก่อสร้าง จะทำการขนส่งด้วยรถเทรลเลอร์ โดยก่อนที่จะยกดาดผนังอุโมงค์ขึ้นรถที่โรงงานผลิตและก่อนที่จะยกลงจากรถที่พื้นที่ก่อสร้างต้องตรวจสอบชนิด หมายเลข และคุณภาพของดาดผนังอุโมงค์

2) งานขนส่งดาดผนังอุโมงค์จากระดับผิวดินถึงพื้นปล่องอุโมงค์ จะขนส่งโดยใช้ Granty Crane หรือ Mobile Crane และ Segment Car โดยก่อนที่จะยกดาดผนังอุโมงค์จากระดับผิวดินลงสู่พื้นปล่องอุโมงค์ที่ระดับขุดเจาะและก่อนการติดตั้งจำเป็นต้องตรวจสอบชนิด หมายเลข คุณภาพของดาดผนังอุโมงค์ จำนวน ตำแหน่ง และความเรียบร้อยของการติดตั้ง Sealing Strip และ Rubber Packer

3) งานติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ เริ่มจากการลำเลียงดาดผนังอุโมงค์โดยใช้ Segment Car ขนส่งเข้าไปยังบริเวณหัวเจาะแล้วใช้เครื่องป้อนชิ้นส่วน (Segment Feeder) ลำเลียงเข้าสู่ตำแหน่งที่จะติดตั้ง หลังจากนั้นจึงเริ่มติดตั้งดาดผนังอุโมงค์โดยใช้ Hydraulic Segment Erector และขันยึดแต่ละชิ้นเข้าด้วยกันโดยยึดเข้ากับดาดผนังอุโมงค์วงที่ติดตั้งไปก่อนหน้า การติดตั้งดาดผนังอุโมงค์จะเริ่มติดตั้งจากตำแหน่งด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนจนครบวงให้ชิ้นส่วน Key สลับกันไปมาในแต่ละวง ยึดแต่ละชิ้นส่วนด้วยอุปกรณ์ที่ออกแบบมา เช่น สลักเกลียวรูปตัวยู (U-Bolt) โดยบริเวณรอยต่อของแต่ละชิ้นส่วนจะมียางกันซึมเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำใต้ดินและน้ำปูน Grout เข้ามาภายในอุโมงค์ โดยขณะติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ Thrust Jack จะหดตัวเฉพาะตำแหน่งที่ติดตั้งชิ้นส่วนแต่ในตำแหน่งอื่นๆ ยังคงค้ำยันกับดาดผนังอุโมงค์วงก่อนหน้าเพื่อให้หัวเจาะต้านทานแรงด้านหน้าไว้

ดาดผนังอุโมงค์ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างค้ำยันซึ่งรับแรงโดยตรงจากแรงดันดินและแรงดันน้ำที่กระทำกับอุโมงค์ การออกแบบและก่อสร้างจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษเพื่อให้มีความแข็งแรงและคงทน โดยทั่วไปดาดผนังอุโมงค์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.3 งานลำเลียงดาดผนังอุโมงค์ถึงพื้นที่ก่อสร้าง

1) Primary Segments เป็นดาดผนังอุโมงค์ชั้นแรกที่ติดตั้งซึ่งสัมผัสกับผิวดิน มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนหลายชิ้นตั้งแต่ 3-10 ชิ้น ความกว้าง 0.5-1.20 เมตร ซึ่งแตกต่างกันไปตามการออกแบบ โดยวัสดุที่ใช้ทำมีได้หลายชนิด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- ดาดผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Segments) นิยมใช้ในงานก่อสร้างอุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากมีราคาประหยัด อายุการใช้งานนาน และสามารถต้านทานการสึกกร่อนได้ดี แต่เนื่องจากน้ำหนักค่อนข้างมาก รวมถึงรอยต่อค่อนข้างไม่แข็งแรงจึงมีแนวโน้มการเสียรูปได้ง่าย

- ดาดผนังอุโมงค์เหล็ก (Steel Segments) ใช้กันทั่วไปในงานก่อสร้างอุโมงค์ขนาดเล็กถึงปานกลาง แต่ละชิ้นส่วนยึดเข้าด้วยกันโดยการเชื่อมและยึดอีกครั้งด้วยแผ่นเหล็ก มีน้ำหนักค่อนข้างเบาจึงง่ายต่อการประกอบและขนย้าย แต่คุณสมบัติการต้านทานการสึกกร่อนไม่ดีเท่าที่ควร โดยเมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้นอาจมีราคาสูงกว่าดาดผนังอุโมงค์ที่เป็นคอนกรีต

- ดาดผนังอุโมงค์เหล็กหล่อเหนียว (Ductile Cast Iron Segments) วัสดุที่ใช้ทำได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติโดยเติมแมกนีเซียมเข้าไปในเหล็กหล่อเพื่อปรับปรุงกำลังและการยืดตัว ทำให้มีกำลังและความแข็งแรงสูงขึ้น จึงเหมาะสำหรับรับน้ำหนักปริมาณมากๆ ดาดผนังอุโมงค์ชนิดนี้สามารถหล่อขึ้นรูปได้ง่าย สะดวกในการขนย้าย สามารถป้องกันน้ำ และทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็ก แต่มีราคาค่อนข้างสูง

- ดาดผนังอุโมงค์ Composite Segments ประกอบขึ้นโดยนำแผ่นเหล็ก (Steel Plate) มาประกบด้านข้างแล้วยึดเข้ากับชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

และสามารถลดความหนาของดาดผนังอุโมงค์ลงได้ แต่จะมีปัญหาบริเวณรอยต่อที่ไม่ค่อยแข็งแรงนัก และปัญหาการสึกกร่อน

2) Secondary Segments เป็นดาดผนังอุโมงค์ที่ติดตั้งซ้อนเข้าไปรองจาก Primary Segments วัตถุประสงค์ของการติดตั้ง Secondary Segments เพื่อช่วยให้ผิวด้านในของอุโมงค์เรียบมากยิ่งขึ้น ป้องกันน้ำและการสึกกร่อน วัสดุที่ใช้ทำเป็นได้ทั้งคอนกรีตเสริมเหล็กหรือท่อเหล็กซึ่งติดตั้งโดยดันให้เลื่อนไถลเข้ามาด้านในอุโมงค์

4.1.2.2 งานขุดเจาะอุโมงค์

ภายหลังจากก่อสร้างปล่องอุโมงค์ (Shaft) และติดตั้งเครื่องขุดเจาะ ระบบท่อขนส่งน้ำปูน ระบบระบายอากาศ ระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ และอุปกรณ์ต่างๆ แล้วเสร็จ จะเริ่มทำการขุดเจาะอุโมงค์จากปล่องเริ่มต้น (Arrival Shaft) ไปยังปล่องปลายทาง (Reception Shaft) โดยงานขุดเจาะอุโมงค์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังต่อไปนี้

1) การเตรียมงานก่อนการขุดเจาะและการขุดเจาะช่วงเริ่มแรก (Initial Drive) ระยะที่ 1 หรือเรียกว่า EPB TBM Launching Process การขุดเจาะช่วงเริ่มแรกนี้ต้องระมัดระวังการพังทลายของดินและการทรุดตัวที่อาจเกิดขึ้นจากการขุดเจาะ มีรายละเอียดดังนี้

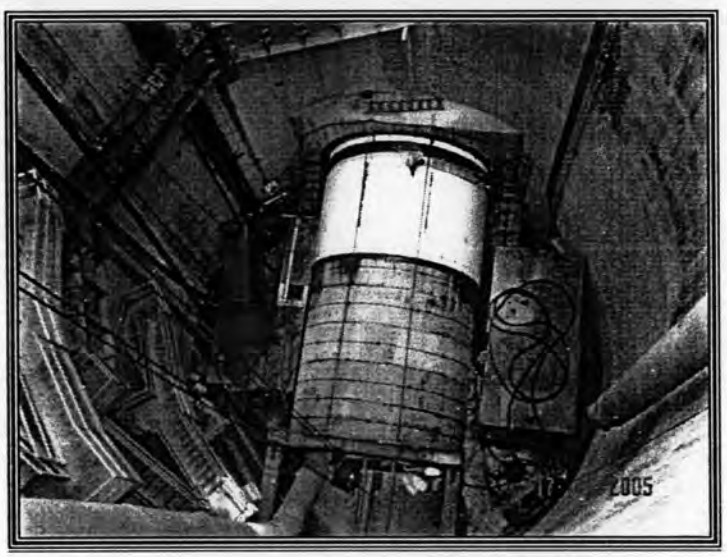
- ถ่ายข้อมูลงานสำรวจจากระดับผิวดินลงสู่ระดับพื้นของปล่องเริ่มต้น เพื่อตรวจสอบค่าระดับและตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เป็นจริงของปล่องอุโมงค์ ผนังปล่องอุโมงค์ชั่วคราว (Soft Eye Opening) พื้นปล่องอุโมงค์ อุโมงค์ และหัวเจาะ หลังจากนั้นติดตั้งแท่นวางหัวเจาะ (Launching Cradle) ที่ระดับพื้นของปล่องอุโมงค์ตามตำแหน่งและค่าระดับที่ออกแบบไว้ เมื่อแล้วเสร็จยกหัวเจาะจากระดับผิวดินลงสู่ระดับพื้นของปล่องอุโมงค์ โดยเริ่มยกในส่วน Front Body Middle Body และ Rear Body ตามลำดับ แล้วติดตั้งอุปกรณ์และงานระบบต่างๆ พร้อมต่อเชื่อมหัวเจาะทั้ง 3 ส่วนเข้าด้วยกัน

- ที่ระดับผิวดินทำการติดตั้ง Back Up Unit และงานระบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบไฟฟ้า ระบบเครื่องกล ระบบระบายน้ำ และระบบทำความเย็น แล้วทดสอบระบบการทำงานของหัวเจาะก่อนเริ่มขุดจริง

- ติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ชั่วคราว (Temporary Segment) เพื่อใช้ในการเคลื่อนตัวของหัวเจาะเข้าสู่ปล่องอุโมงค์ โดยเว้นระยะห่างให้เพียงพอที่จะรื้อถอนค้ำยันและแผ่นเหล็กออกจากดาดผนังปล่องอุโมงค์ แล้วเริ่มขุดเจาะผ่านผนังปล่องอุโมงค์ชั่วคราว โดยหัวเจาะจะถูกดันเคลื่อนตัวไปข้างหน้ายังทิศทางที่ต้องการ Cutter Head ของหัวเจาะจะหมุนและกัดผนังของปล่องอุโมงค์

ชั่วคราวที่เตรียมเอาไว้ หลังจากนั้นเริ่มประกอบดาดผนังอุโมงค์ชั่วคราว พร้อมทั้งตรวจสอบตำแหน่งและทิศทางของหัวเจาะขณะขุดเจาะอุโมงค์ด้วย

- เริ่มกระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ช่วง Initial Drive เมื่อหัวเจาะพ้นออกจากปล่องเริ่มต้น กระบวนการขุดเจาะประกอบด้วยการดำเนินการขุดเจาะ ฉีดน้ำปูน (Primary & Secondary Grout) การขนย้ายดิน การติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ และการตรวจสอบตำแหน่งและทิศทางของหัวเจาะจนได้ระยะทางที่กำหนด



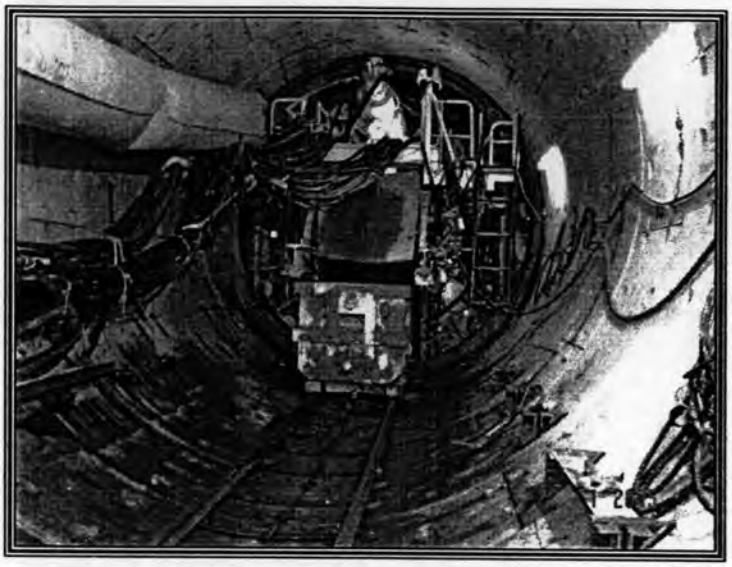
รูปที่ 4.4 ขุดเจาะผ่านผนังปล่องอุโมงค์ชั่วคราว

2) การขุดเจาะช่วงเริ่มแรก (Initial Drive) ระยะที่ 2 เริ่มต้นเมื่อหัวเจาะพ้นออกจากปล่องเริ่มต้นแล้วดำเนินการขุดเจาะอุโมงค์ต่อไปข้างหน้าอย่างช้าๆ และประกอบดาดผนังอุโมงค์จนได้ระยะทางภายในอุโมงค์ที่เพียงพอต่อการติดตั้งชุดอุปกรณ์ ระบบขุดเจาะก็จะหยุดเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ตลอดระยะทางที่หัวเจาะเคลื่อนที่ไป รายละเอียดมีดังนี้

- รื้อย้ายส่วนบนของดาดผนังอุโมงค์ชั่วคราวที่ระดับพื้นปล่องอุโมงค์ เพื่อใช้เป็นพื้นที่สำหรับขนส่งวัสดุและขนย้ายดินออกจากอุโมงค์ ทำการย้ายอุปกรณ์ส่วนท้ายจากระดับผิวดินลงสู่ระดับพื้นปล่องอุโมงค์แล้วเชื่อมต่อระบบเข้าด้วยกัน อุปกรณ์นี้ประกอบไปด้วยระบบไฮดรอลิค (Hydraulic Power Unit) ระบบรอกยกดาดผนังอุโมงค์ (Segment Granty Crane) ระบบสายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor System) ระบบไฟฟ้ากำลัง (Electrical System) ระบบความปลอดภัยและระบบดับเพลิง (Safety System) และระบบฉีดน้ำปูน (Grouting System)

- ดำเนินการขุดเจาะ ฉีดน้ำปูน ขนย้ายดิน ติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ และตรวจสอบตำแหน่งและทิศทางของหัวเจาะจนได้ระยะทางตามกำหนด

- ที่ระดับพื้นปล่องอุโมงค์รื้อย้ายดาดผนังอุโมงค์ชั่วคราว แท่นวางหัวเจาะ แล้วติดตั้ง Temporary Platform และระบบสับหลีกรางรถไฟ (Car Shifter) เพื่อเริ่มเข้าสู่การเจาะอุโมงค์หลัก



รูปที่ 4.5 การติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ถาวร

3) การขุดเจาะอุโมงค์หลัก (Main Drive) หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการเจาะอุโมงค์ช่วง Initial Drive ซึ่งมีความยาวประมาณ 150 เมตร (แตกต่างกันไปในแต่ละโครงการ) จะเข้าสู่ขั้นตอนการเจาะอุโมงค์ในขั้นตอนปกติ ซึ่งจะดำเนินการในลักษณะนี้จนเสร็จสิ้นงาน

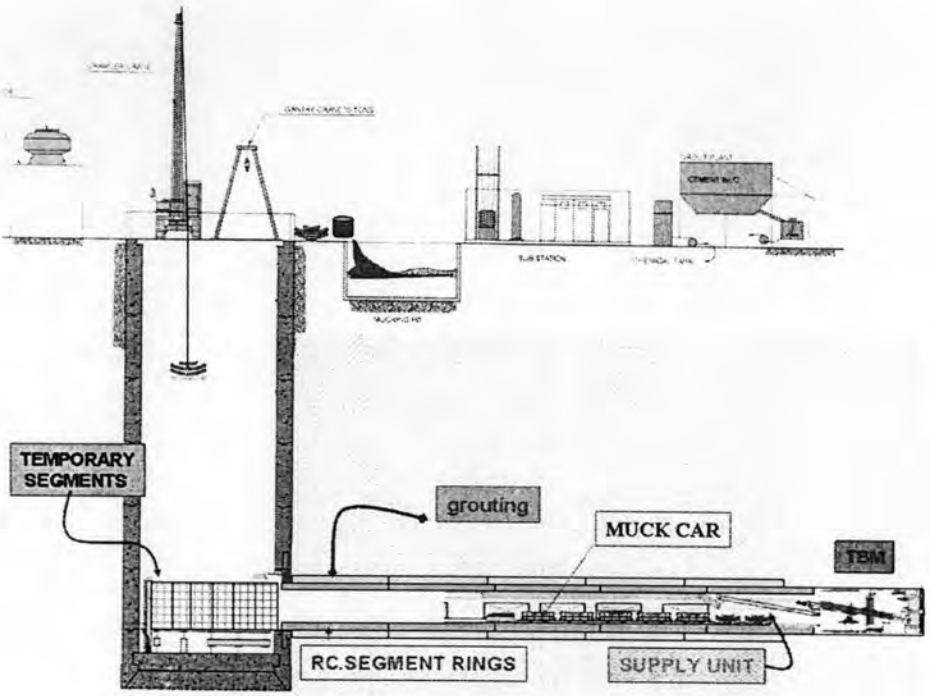
- ดำเนินการขุดเจาะ ฉีดน้ำปูน ขนย้ายดิน ติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ และตรวจสอบตำแหน่งและทิศทางของหัวเจาะจนได้ระยะหนึ่งซึ่งอาจจะออกแบบให้บริเวณนี้เป็นพื้นที่บำรุงรักษา (Maintenance Area) เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบสภาพหัวเจาะและเปลี่ยน Copy Cutter การขุดเจาะจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งส่วนท้ายของหัวเจาะเคลื่อนตัวผ่านพื้นที่บำรุงรักษา

- ต่อเชื่อมปล่องระบายอากาศชั่วคราวเข้ากับดาดผนังอุโมงค์ด้านบนบริเวณตำแหน่งที่กำหนด หลังจากนั้นดำเนินการขุดเจาะต่อไปจนกระทั่งเหลือระยะทางขุดเจาะประมาณ 10 เมตร

- ตรวจสอบสภาพความแข็งแรงและความทึบน้ำของดินบริเวณด้านนอกของผนังปล่องอุโมงค์ชั่วคราว โดยเจาะผนังปล่องอุโมงค์ชั่วคราวเพื่อเก็บตัวอย่างดิน และตรวจสอบตำแหน่งและทิศทางของหัวเจาะเทียบกับตำแหน่งของผนังอุโมงค์ชั่วคราวที่บริเวณปล่องปลายทาง

- ติดตั้งแท่นวางหัวเจาะที่ระดับพื้นของปล่องอุโมงค์ปลายทางตามตำแหน่งและค่าระดับของหัวเจาะเพื่อรองรับหัวเจาะที่จะเจาะผ่านผนังปล่องอุโมงค์ หลังจากนั้นรื้อย้ายค้ำยันและ

แผ่นเหล็กออกจากผนังปล่องอุโมงค์ชั่วคราว แล้วเริ่มขุดเจาะผ่านผนังปล่องอุโมงค์จนกระทั่งส่วนท้ายของหัวเจาะเคลื่อนตัวผ่านทั้งหมดจึงรื้อย้ายหัวเจาะออกจากปล่องอุโมงค์ แล้วอุดช่องว่างและรอยต่อของผนังปล่องอุโมงค์ ทำความสะอาดภายในอุโมงค์ที่ระดับพื้นปล่องอุโมงค์



รูปที่ 4.6 การขุดเจาะอุโมงค์โดยเครื่องขุดเจาะระบบสมดุลแรงดันดิน
(ที่มา: มานิต ปานเอม, 2549)

ทุกช่วงการทำงานของหัวเจาะจะอาศัยแรงดันจาก Thrust Jacks ซึ่งเป็นชุดแม่แรงไฮดรอลิคที่วางตัวอยู่โดยรอบด้านท้ายของหัวเจาะ โดยจะออกแรงดันกับดาดผนังอุโมงค์วงสุดท้ายที่ติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว (ในกรณีการขุดเจาะอุโมงค์วงแรกจะออกแรงดันกับดาดผนังอุโมงค์ชั่วคราว พร้อมกับหมุนกัดดิน โดยดินขุดจะได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการเติมสารผสมเพิ่มเข้าไปในดินที่อยู่ใน Soil Chamber แล้วกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อให้มีความทึบน้ำและสามารถลำเลียงผ่าน Screw Conveyor ได้อย่างราบรื่น

ในระหว่างที่หัวเจาะทำงานจะต้องตรวจวัดและควบคุม Face Pressure แนวและระดับของการขุดเจาะด้วย สิ่งที่สำคัญ คือ ปริมาณดินที่ขุดเจาะเข้ามาใน Soil Chamber จะต้องสมดุลกับปริมาณดินที่ลำเลียงออก และหลังจากที่ขุดเจาะจนได้พื้นที่ว่างบริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะเพียงพอก็เริ่มติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ด้วย Segment Erector โดยชุดแม่แรงตรงตำแหน่งที่ประกอบชิ้นส่วนจะ

หดกลับเพื่อประกอบชิ้นส่วนดาดผนังอุโมงค์ ณ ตำแหน่งนั้น เมื่อประกอบและยึดชิ้นส่วนดาดผนังอุโมงค์จนครบวงแล้วหัวเจาะจะเริ่มดำเนินการขุดเจาะต่อไป

ดินที่ขุดได้จากด้านหน้าหัวเจาะจะลำเลียงผ่าน Screw Conveyor ไปยังรถขนดินเพื่อลำเลียงออกไปด้วยขบวนรถจักรไปยังปล่องอุโมงค์เพื่อนำออกนอกพื้นที่ก่อสร้างต่อไป ขณะที่งานเจาะอุโมงค์คืบหน้าไป อุปกรณ์สนับสนุน เช่น ท่อน้ำ ระบบไฟฟ้า รางรถไฟ และระบบระบายอากาศ จะถูกต่อเชื่อมขยายออกไปตามความก้าวหน้าของงานตลอดความยาวของการขุดเจาจนกว่างานก่อสร้างอุโมงค์แล้วเสร็จ

ทั้งนี้ระหว่างการขุดเจาะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ระบบควบคุมแรงดันดินและระบบควบคุมปริมาณดินที่ขุดออกจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุล (Balance State) เพื่อป้องกันการขุดดินมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้ดินด้านบนเหนือตำแหน่งหัวเจาะยุบตัวลงมา หรือหากเกิดสภาวะขุดดินน้อยเกินไปก็จะทำให้ผิวดินด้านบนเหนือตำแหน่งหัวเจาะปูดหรือถูกดันนูนขึ้น การควบคุมในส่วนนี้จะคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์โดยพนักงานควบคุมหัวเจาะและวิศวกรงานอุโมงค์

4.1.2.3 งานอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting)

การอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์เป็นการเติมวัสดุเข้าไปในช่องว่างระหว่างผิวด้านนอกของดาดผนังอุโมงค์ที่ประกอบแล้วเสร็จกับผิวของการขุดที่เรียกว่า Tail Void โดยช่องว่างนี้จำเป็นต้องถูกเติมด้วยวัสดุอื่นให้เต็มผ่านทางรู (Grout Hole) ที่เตรียมไว้ที่ดาดผนังอุโมงค์ตั้งแต่การหล่อ การอุดช่องว่างนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทรุดตัวลงมาของดินด้านบน นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันการไหลซึมของน้ำเข้าสู่ด้านในอุโมงค์อีกด้วย งานอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่

1) Primary Grouting กระทำทันทีที่หัวเจาะเคลื่อนตัวผ่าน Grout Hole ของดาดผนังอุโมงค์ที่หลุดออกจากด้านท้ายของหัวเจาะ เพื่อป้องกันการทรุดตัวของดินเนื่องจากช่องว่างดังกล่าว น้ำปูนถูกฉีดด้วยระบบปั๊มซึ่งติดตั้งไว้ที่หัวเจาะโดยมีการควบคุมปริมาณน้ำปูนและความดันที่ฉีดด้วย การต่อหัวท่อ Grout นั้นต่อเข้ากับ Segment Grout Hole โดยอัดฉีดน้ำปูนจากจุดล่างแล้วจึงเลื่อนขึ้นมาที่ตำแหน่งสูงขึ้นจนกว่าน้ำปูนเต็มช่องว่างภายนอก

2) Secondary Grouting หลังจากทำการ Primary Grouting แล้วปล่อยให้น้ำปูนที่ฉีดเข้าไปแข็งตัว ซึ่งอาจจะเกิดการหดตัวหรือเกิดช่องว่างที่ไม่เต็มในการฉีดน้ำปูนครั้งแรก จึงจำเป็นต้องทำ Secondary Grouting อีกครั้ง โดยปกติของงานอุโมงค์จะทำ Secondary Grouting ที่ท้ายขบวนของ Back up Trailer ของระบบหัวเจาะซึ่งมีระยะห่างจากหัวเจาะประมาณ 70 เมตร

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2.4 งานขนย้ายและลำเลียงดิน

การขนย้ายและลำเลียงดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์จะใช้ขบวนรถจักร (Train) ลากจูงรถบรรทุกดินเปล่าเข้าไปรับดินที่บริเวณขุดเจาะ หลังจากนั้นจึงลำเลียงดินออกมาเพื่อนำไปทิ้งที่ระดับผิวดิน ในขบวนรถจักรแต่ละขบวนจะประกอบด้วยรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Transport Bogies) รถขนดิน (Muck Skip Bogies) รถขนน้ำปูนพร้อมระบบอัดน้ำปูน (Grout Car) หัวรถจักรไฟฟ้า (Battery Locomotive) และรถโดยสาร (Passengers Car) ทั้งนี้จำนวนของขบวนรถจักรและรางสับหลีกที่ใช้เพื่อลดระยะเวลาในการขนส่งแต่ละช่วงของงานอุโมงค์จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการขุดเจาะและระยะทางที่ขนย้ายดิน ดังนั้นการคำนวณและการจัดระบบขนส่งภายในอุโมงค์เป็นสิ่งที่สำคัญยิ่งต่อความก้าวหน้าของงาน รวมไปถึงการเตรียมอะไหล่หัวรถจักร แบตเตอรี่สำรอง และระบบประจุกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4. 7 ระบบสนับสนุนการขุดเจาะอุโมงค์ (ที่มา: มานิต ปานเอม, 2549)

4.2 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยเครื่องขุดเจาะที่ศึกษา

ในงานวิจัยนี้ศึกษารวบรวมข้อมูลของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ของหน่วยงานภาครัฐ 3 หน่วยงาน รวมทั้งสิ้น 5 โครงการ ซึ่งทั้งหมดเป็นโครงการก่อสร้างอุโมงค์เพื่อระบบสาธารณูปโภคด้วยเครื่องขุดเจาะระบบสมดุลแรงดันดิน ข้อมูลทั่วไปของโครงการที่ศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยมีรายชื่อโครงการดังต่อไปนี้

1) โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำ ของสำนักการระบายน้ำ สังกัดกรุงเทพมหานคร

โครงการที่ 1 อุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา

โครงการที่ 2 อุโมงค์ระบายน้ำจากบึงมักกะสันลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา

2) โครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ ของการประปานครหลวง

โครงการที่ 3 อุโมงค์ส่งน้ำจากประตูน้ำทับช้างถึงสถานีสูบจ่ายน้ำบางพลี

โครงการที่ 4 อุโมงค์ส่งน้ำจากถนนวงแหวนรอบนอกตากสิน-เพชรเกษม ถึงถนนพระราม 2

3) โครงการก่อสร้างอุโมงค์สายส่งไฟฟ้า ของการไฟฟ้านครหลวง

โครงการที่ 5 อุโมงค์สายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีต้นทางบางกะปิ ถึงสถานีต้นทางชิดลม

โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำของสำนักการระบายน้ำ สังกัดกรุงเทพมหานคร มีวัตถุประสงค์ของโครงการเพื่อช่วยเพิ่มการระบายน้ำ แก้ไขปัญหาน้ำในคลองล้นท่วมพื้นที่อันก่อให้เกิดปัญหาน้ำท่วม โดยอุโมงค์ในโครงการที่ 1 ขุดเจาะลึกจากพื้นดินประมาณ 27 เมตร จุดก่อสร้างของโครงการเริ่มจากบริเวณจุดบรรจบคลองลาดพร้าวและคลองแสนแสบไปตามแนวคลองแสนแสบ คลองตัน ถนนสุขุมวิท และคลองพระโขนง ลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณปากคลองพระโขนง โดยมีการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ 2 ปล่องที่บริเวณหัวและท้ายอุโมงค์ ซึ่งก่อสร้างเป็นอาคารรับน้ำและสถานีสูบน้ำด้วย สำหรับโครงการที่ 2 อุโมงค์วางตัวที่ระดับความลึกระหว่าง 20-35 เมตร แนวของอุโมงค์ระบายน้ำเริ่มที่ลอดผ่านทางด่วนจตุรทิศ ผ่านพื้นที่โรงซ่อมรถไฟมักกะสันไปตามแนวของการรถไฟแห่งประเทศไทย แม่น้ำเจ้าพระยา ผ่านถนนเพชรบุรี คลองแสนแสบ และถนนสุขุมวิท ลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาที่คลองขุดวัดช่องลม ประกอบด้วยปล่องอุโมงค์ 5 ปล่อง ซึ่งใช้เป็นอาคารรับน้ำและสถานีสูบน้ำเช่นเดียวกับโครงการที่ 1 ดาดผนังอุโมงค์สำหรับการระบายน้ำมีเฉพาะ Primary Segments เท่านั้น ซึ่งเป็นดาดผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก ยกเว้นบริเวณที่มีความโค้งมากๆ จะใช้เป็นดาดผนังอุโมงค์เหล็กแทน

โครงการก่อสร้างอุโมงค์ของหน่วยงานที่ 2 การประปานครหลวง เป็นอุโมงค์ส่งน้ำเพื่อขยายโครงข่ายและเพิ่มศักยภาพการส่งจ่ายให้มีพื้นที่ใช้น้ำประปาครอบคลุมมากยิ่งขึ้น การขุดเจาะอุโมงค์ในโครงการที่ 3 แนวก่อสร้างเริ่มตั้งแต่แยกทับช้างจากประตูน้ำทับช้างไปตามถนนวงแหวนรอบนอกเข้าถนนบางนา-ตราด บางพลี จนถึงสถานีสูบจ่ายน้ำบางพลี ภายในโครงการประกอบด้วย

ตารางที่ 4.1 สรุปข้อมูลทั่วไปของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ศึกษา

รายละเอียดโครงการ	โครงการที่ 1	โครงการที่ 2
ชื่อโครงการ	อุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา	อุโมงค์ระบายน้ำจากบึงมักกะสันลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา
ผู้ว่าจ้าง	สำนักการระบายน้ำ สังกัดกรุงเทพมหานคร	สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร
ผู้รับจ้าง	กิจการร่วมค้า ไอเอ็น	บริษัท ช.การช่าง จำกัด (มหาชน)
วิศวกร	-	บริษัท ไทยเอ็นจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์ จำกัด
วันเริ่มต้นโครงการ	23 กรกฎาคม 2546	21 พฤษภาคม 2547
วันสิ้นสุดโครงการ	1 กรกฎาคม 2550	29 เมษายน 2551
ระยะเวลาโครงการตามสัญญา (วัน)	1,440	1,440
รูปแบบสัญญา	สัญญาแบบราคาต่อหน่วย (Unit Price Contracts) ระบบออกแบบ-ก่อสร้าง (Design-Build)	สัญญาแบบราคาต่อหน่วย (Unit Price Contracts) ระบบออกแบบ-ก่อสร้าง (Design-Build)
มูลค่าสัญญา (บาท)	2,094,995,800	2,166,000,000
รายละเอียดของอุโมงค์	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 5.00 เมตร ระยะทาง 5.30 กิโลเมตร	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4.60 เมตร ระยะทาง 6.20 กิโลเมตร

ตารางที่ 4.1 สรุปข้อมูลทั่วไปของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ศึกษา (ต่อ)

รายละเอียดโครงการ	โครงการที่ 3	โครงการที่ 4	โครงการที่ 5
ชื่อโครงการ	อุโมงค์ส่งน้ำจากประตูน้ำทับช้างถึงสถานีสูบจ่ายน้ำบางพลี	อุโมงค์ส่งน้ำจากถนนวงแหวนรอบนอกตากสิน-เพชรเกษม ถึงถนนพระราม 2	อุโมงค์สายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีต้นทางบางกะปิถึงสถานีต้นทางชิดลม
ผู้ว่าจ้าง	การประปานครหลวง	การประปานครหลวง	การไฟฟ้านครหลวง
ผู้รับจ้าง	บริษัท สี่แสงการโยธา (1979) จำกัด	บริษัท นวรัตน์ เอ.เอส.แอสโซซิเอท ร่วมค้า จำกัด	NEON Consortium
วิศวกร	บริษัท ไทยเอ็นจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์ จำกัด	บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเมนท์ จำกัด บริษัท แอสดีคอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด	ATT Consultants Co.,Ltd.,Tepsco Tokyo Electric Power Service Co.,Ltd. EDF (Electricite de France)
วันเริ่มต้นโครงการ	19 พฤษภาคม 2547	14 กันยายน 2547	13 พฤษภาคม 2548
วันสิ้นสุดโครงการ	17 กรกฎาคม 2549	13 กันยายน 2549	12 เมษายน 2552
ระยะเวลาโครงการตามสัญญา (วัน)	790	730	1,430
รูปแบบสัญญา	สัญญาแบบเหมารวม (Lump Sum Contracts) ระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้าง (Design-Bid-Build)	สัญญาแบบเหมารวม (Lump Sum Contracts) ระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้าง (Design-Bid-Build)	สัญญาแบบเหมารวม (Lump Sum Contracts) ระบบออกแบบ-ก่อสร้าง (Design-Build)
มูลค่าสัญญา (บาท)	1,838,820,734	661,000,000	2,998,000,000
รายละเอียดของอุโมงค์	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.80 เมตร ระยะทาง 17.543 กิโลเมตร	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.50 เมตร 3.33 กิโลเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.00 เมตร 2.70 กิโลเมตร	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.62 เมตร ระยะทาง 7.00 กิโลเมตร

ปล่องอุโมงค์ทั้งหมด 7 ปล่อง โดยเป็นปล่องอุโมงค์ชั่วคราวสำหรับทำงาน (Temporary Working Shaft) 4 ปล่อง ส่วนโครงการที่ 4 อุโมงค์วางตัวที่ระดับความลึกประมาณ 21 เมตร การก่อสร้างเริ่มจากบริเวณถนนวงแหวนรอบนอกตากสิน-เพชรเกษม โดยแนวอุโมงค์ลอดใต้คลองราชมนตรี ซึ่งเป็นพื้นที่ของกรุงเทมหานคร และถนนพระราม 2 ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวง มีปล่องอุโมงค์ทั้งหมด 6 ปล่อง เป็นปล่องอุโมงค์ชั่วคราวสำหรับทำงาน 3 ปล่อง ลักษณะของอุโมงค์ส่งน้ำมี Primary Segments เป็นดาดผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก บางช่วงที่มีความโค้งมากๆ จะใช้เป็นดาดผนังอุโมงค์เหล็ก และมี Secondary Segments ที่เป็นท่อเหล็กเหนียวอยู่ภายในชั้นที่ 2 ด้วย

โครงการก่อสร้างของหน่วยงานสุดท้ายเป็นโครงการก่อสร้างอุโมงค์สายส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง วัตถุประสงค์ของโครงการเพื่อช่วยเสริมให้การจ่ายไฟฟ้ามีความมั่นคงในระบบไฟฟ้า และรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นในอนาคตได้อย่างเพียงพอ แนวการขุดเจาะทั้งหมดลอดใต้คลองแสนแสบซึ่งเป็นพื้นที่ของกรุงเทพมหานคร การขุดเจาะอุโมงค์มีอยู่หลายระดับจาก 26-33 เมตร ประกอบด้วย 10 ปล่องอุโมงค์ ดาดผนังอุโมงค์มีลักษณะเช่นเดียวกับอุโมงค์ระบายน้ำในโครงการที่ 1 และ 2 คือ มีเฉพาะ Primary Segments เป็นดาดผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนบริเวณที่มีความโค้งมากๆ จะใช้เป็นดาดผนังอุโมงค์เหล็กแทนเช่นเดียวกัน

4.2.1 รูปแบบของระบบการจัดทำและส่งมอบโครงการ (Project Delivery System)

ระบบการการจัดทำและส่งมอบโครงการ คือ การจัดรูปแบบและกำหนดขอบเขตของกลุ่มที่จะเข้ามาให้บริการในการจัดทำและส่งมอบโครงการ จากข้อมูลของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ศึกษาทั้ง 5 โครงการพบว่ารูปแบบของระบบการจัดทำและส่งมอบโครงการที่ใช้มี 2 รูปแบบ คือ ระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้าง หรือ Design-Bid-Build (D-B-B) มีใช้ใน 2 โครงการ และระบบออกแบบ-ก่อสร้าง หรือ Design-Build (D-B) มีใช้ใน 3 โครงการ รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

4.2.1.1 ระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้าง หรือ Design-Bid-Build (D-B-B)

ระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้างนั้นเป็นระบบที่ใช้กันมาเป็นเวลานานและแพร่หลายในงานก่อสร้างในอดีต การก่อสร้างด้วยระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้างนี้แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอน ตามชื่อของระบบ โดยผู้ว่าจ้างซึ่งเป็นหน่วยงานของรัฐทำสัญญา 2 ฉบับ ฉบับแรกทำกับบริษัทที่ทำหน้าที่เป็นผู้ออกแบบ รับผิดชอบทั้งการออกแบบเบื้องต้น (Preliminary Design) การออกแบบรายละเอียด (Detailed Design) ให้คำปรึกษาและแก้ไขแบบระหว่างก่อสร้าง รวมทั้งจัดเตรียมรายละเอียดประกอบแบบ (Specifications) และแบบรูป (Drawings) ต่างๆ ให้แก่ผู้รับจ้าง

บางครั้งขอบเขตการให้บริการอาจครอบคลุมถึงการเป็นตัวแทนผู้ว่าจ้างเพื่อควบคุมงานระหว่างก่อสร้างด้วย อีกฉบับหนึ่งทำกับผู้รับจ้าง ซึ่งรับผิดชอบเฉพาะงานก่อสร้างเพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุนี้ก่อนที่จะมีการคัดเลือกผู้รับจ้างแบบก่อสร้างที่ได้จากผู้ออกแบบจะต้องมีความสมบูรณ์เพียงพอเพื่อให้ผู้สนใจประกวดราคาสามารถเสนอราคาได้ จากนั้นจึงเป็นขั้นตอนการคัดเลือกผู้รับจ้างเพื่อมาดำเนินการก่อสร้างจนแล้วเสร็จโครงการ

จากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ศึกษามี 2 โครงการ ที่เป็นระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้าง ได้แก่ โครงการที่ 3 และ 4 โดยมีลักษณะการทำงานแตกต่างกันเล็กน้อยในส่วนของวิศวกรซึ่งเป็นตัวแทนผู้ว่าจ้าง นั่นคือ ในโครงการที่ 3 ผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานที่ผู้ว่าจ้างจัดจ้างมานั้นเป็นบริษัทเดียวกัน หรือที่เรียกว่า วิศวกรออกแบบและปรึกษา (Design and Consulting Engineer) โดยรับผิดชอบงานออกแบบทั้งหมดและเป็นตัวแทนผู้ว่าจ้างเพื่อควบคุมงานระหว่างก่อสร้าง หากมีปัญหาเกี่ยวกับแบบก่อสร้างหรือการดำเนินงานวิศวกรจะเป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างผู้ว่าจ้าง ผู้รับจ้าง และผู้ออกแบบ รวมทั้งมีบทบาทในการให้คำปรึกษาเพื่อคัดเลือกผู้รับจ้างและจัดเตรียมเอกสารสัญญาต่างๆ ด้วย

ส่วนโครงการที่ 4 งานออกแบบทั้งหมดรวมไปถึงการให้คำปรึกษาแก่ผู้ว่าจ้างในการคัดเลือกผู้รับจ้างและจัดเตรียมเอกสารสัญญายังคงเป็นความรับผิดชอบของวิศวกร แต่ไม่รวมถึงการทำหน้าที่ควบคุมงานระหว่างก่อสร้าง ดังนั้นวิศวกรในโครงการนี้จึงเป็นเพียงวิศวกรออกแบบ (Design Engineer) โดยผู้ที่ทำหน้าที่ควบคุมงานระหว่างก่อสร้างเป็นบุคลากรของผู้ว่าจ้างเอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้บุคลากรของตนสามารถเรียนรู้และมีประสบการณ์ในการควบคุมงานก่อสร้างอุโมงค์ แต่ผู้ว่าจ้างยังคงจัดจ้างบุคลากรของวิศวกรออกแบบที่มีความชำนาญด้านเทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อทำหน้าที่เป็นผู้ตรวจสอบ (Inspector) ดูแลการก่อสร้างให้สอดคล้องตามที่ผู้ออกแบบกำหนดมา

4.2.1.2 ระบบออกแบบ-ก่อสร้าง หรือ Design-Build (D-B)

ในเบื้องต้นผู้ว่าจ้างมีเฉพาะข้อมูลโครงการย่อๆ (Project Brief) เท่านั้น ซึ่งระบุถึงความต้องการหลักของโครงการ เช่น ตำแหน่งของปล่องอุโมงค์ ความสามารถในการระบายน้ำหรือขนาดของอุโมงค์ ความหนาของดาดผนังอุโมงค์ ความลาดชัน ความยาว แนวเส้นทาง และความลึกของอุโมงค์โดยประมาณ เป็นต้น ผู้รับจ้างซึ่งเป็นทั้งผู้ออกแบบและผู้ก่อสร้าง (Design-Builder) ที่มีความสนใจจะเข้ามายื่นข้อเสนอการให้บริการทั้งส่วนของการออกแบบและก่อสร้าง วิธีนี้แตกต่างจากระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้างตรงที่ผู้ว่าจ้างทำสัญญาเพียงหนึ่งฉบับกับผู้ที่ชนะการประกวดราคา หลังจากนั้นผู้ชนะการประกวดราคาต้องรับผิดชอบออกแบบรายละเอียด โดยสามารถนำเอาความคิดเห็นและประสบการณ์ของผู้รับจ้างเข้ามาร่วมในการออกแบบได้ แบบที่ได้จึงมีความสามารถ

สร้างได้ (Constructibility) มากยิ่งขึ้น สามารถช่วยลดข้อโต้แย้งที่มักจะเกิดขึ้นระหว่างผู้ออกแบบกับผู้รับจ้างในระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้าง แต่ปัญหาที่มักจะเกิดขึ้น คือ การขอเปลี่ยนแปลงการออกแบบจากผู้รับจ้างอันเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงงานขึ้นบ่อยครั้ง

โครงการก่อสร้างที่ศึกษามี 3 โครงการ ที่เป็นระบบออกแบบ-ก่อสร้าง ได้แก่ โครงการที่ 1 2 และ 5 ลักษณะการทำงานในแต่ละโครงการนั้นมีความแตกต่างกัน โดยความรับผิดชอบในส่วนของการออกแบบรายละเอียดและงานก่อสร้างทั้งหมดเป็นของผู้รับจ้าง ในโครงการที่ 1 และ 2 ซึ่งมีผู้ว่าจ้างเดียวกันนั้นผู้ว่าจ้างรับผิดชอบงานออกแบบเบื้องต้นเอง โดยโครงการที่ 1 ผู้รับจ้างจะต้องเสนอชื่อบริษัทที่รับผิดชอบงานออกแบบและบริษัทที่ดูแลระบบรับประกันคุณภาพงาน (Quality Assurance: QA) เพื่อปฏิบัติงานในนามของผู้รับจ้างให้ผู้ว่าจ้างพิจารณาตั้งแต่ขั้นตอนการเสนอราคา หน้าที่ของ QA คือ เป็นผู้ตรวจสอบแบบก่อสร้าง (Design Checker) ที่ได้จากผู้รับจ้าง ตรวจสอบคุณภาพงานระหว่างก่อสร้างและให้ความเห็นชอบผู้ว่าจ้างก่อนอนุมัติ ดังนั้นในโครงการนี้จึงไม่มีวิศวกรที่ปรึกษา (Consulting Engineer) ที่เป็นตัวแทนของผู้ว่าจ้างมาประจำสถานที่ก่อสร้าง ผู้ว่าจ้างส่งเพียงบุคลากรของตนเองมาควบคุมการทำงานเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากโครงการที่ 2 ที่ผู้ว่าจ้างจัดหาวิศวกรที่ปรึกษาตั้งแต่ก่อนเริ่มโครงการ เข้ามามีส่วนร่วมให้คำปรึกษาเพื่อคัดเลือกผู้รับจ้าง และเป็นเสมือนตัวแทนผู้ว่าจ้างเพื่อควบคุมงานระหว่างก่อสร้าง ส่วนโครงการที่ 5 นั้นมีวิศวกรออกแบบและปรึกษาทำหน้าที่เช่นเดียวกับวิศวกรที่ปรึกษาในโครงการที่ 2 แต่รับผิดชอบในส่วนของงานออกแบบเบื้องต้นด้วย

ตารางที่ 4.2 สรุปรูปแบบและขอบเขตงานของฝ่ายที่เกี่ยวข้องในการจัดทำและส่งมอบโครงการ

ขอบเขตงานที่รับผิดชอบ	โครงการที่				
	1	2	3	4	5
ระบบการจัดทำและส่งมอบโครงการ	D-B	D-B	D-B-B	D-B-B	D-B
ออกแบบเบื้องต้น (Preliminary Design)	E	E	DC	DE	DC
ออกแบบรายละเอียด (Detailed Design)	C	C	DC	DE	C
คัดเลือกผู้รับจ้างและจัดเตรียมเอกสารสัญญาร่วมกับผู้ว่าจ้าง	-	CE	DC	DE	DC
ควบคุมงานระหว่างก่อสร้าง	C	CE	DC	E	DC
ดำเนินการก่อสร้าง	C	C	C	C	C

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบขอบเขตงานของฝ่ายที่เกี่ยวข้องระหว่างระบบ Design-Build และ Design-Bid-Build

ขอบเขตงานที่รับผิดชอบ	ระบบการจัดทำและส่งมอบโครงการ	
	Design-Build (D-B)	**Design-Bid-Build (D-B-B)**
ออกแบบเบื้องต้น (Preliminary Design)	E หรือ DC	DC หรือ DE
ออกแบบรายละเอียด (Detailed Design)	C	DC หรือ DE
คัดเลือกผู้รับจ้างและจัดเตรียมเอกสารสัญญาร่วมกับผู้ว่าจ้าง	CE หรือ DC	DC หรือ DE
ควบคุมงานระหว่างก่อสร้าง	C หรือ CE หรือ DC	DC หรือ E
ดำเนินการก่อสร้าง	C	C

หมายเหตุ

D-B = Design-Build

D-B-B = Design-Bid-Build

C = ผู้รับจ้าง (Contractor)

E = ผู้ว่าจ้าง (Employer)

CE = วิศวกรที่ปรึกษา (Consulting Engineer)

DC = วิศวกรออกแบบและปรึกษา (Design and Engineer)

DE = วิศวกรออกแบบ (Design Engineer)

จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาผู้รับผิดชอบในแต่ละขอบเขตงานพบว่า

- งานออกแบบเบื้องต้นรับผิดชอบโดยวิศวกรของผู้ว่าจ้าง หรือที่เรียกว่า In House Engineer (โครงการที่ 1 และ 2) หรือโดยวิศวกรที่ผู้ว่าจ้างจัดหามา (โครงการที่ 3 4 และ 5)

- ความรับผิดชอบการออกแบบรายละเอียดนั้น ขึ้นอยู่กับรูปแบบระบบจัดทำและส่งมอบโครงการ หากเป็นระบบออกแบบ-ก่อสร้างความรับผิดชอบย่อมเป็นของผู้รับจ้าง (โครงการที่ 1 2 และ 5) ส่วนระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้างผู้รับผิดชอบยังคงเป็นเช่นเดียวกับงานออกแบบเบื้องต้น คือ วิศวกร (โครงการที่ 3 และ 4)

- กระบวนการคัดเลือกผู้รับจ้างและจัดเตรียมเอกสารสัญญานั้น ในบางโครงการจะกระทำโดยผู้ว่าจ้างเองทั้งหมด (โครงการที่ 1) หรือร่วมกันพิจารณากับวิศวกรที่เพิ่งเข้ามามีส่วนร่วมในขั้นตอนนี้ (โครงการที่ 2) หรือวิศวกรที่มีส่วนร่วมมาตั้งแต่งานออกแบบเบื้องต้น (โครงการที่ 3 4 และ 5)

- ในกระบวนการก่อสร้างข่อมเป็นหน้าที่ของผู้รับจ้าง ส่วนการควบคุมงานระหว่างก่อสร้างนั้นมีหนึ่งโครงการที่ผู้ว่าจ้างทำหน้าที่ควบคุมงานเอง (โครงการที่ 4) ส่วนโครงการอื่นๆ มีตัวแทนผู้ว่าจ้าง คือ วิศวกร ซึ่งอาจจะเป็นวิศวกรที่ปรึกษาที่มีส่วนร่วมตั้งแต่การให้คำปรึกษาเพื่อคัดเลือกผู้รับจ้างและจัดเตรียมเอกสารสัญญา หรือวิศวกรออกแบบและปรึกษาที่ร่วมงานกับผู้ว่าจ้างมาตั้งแต่การออกแบบเบื้องต้น โดยมีอยู่หนึ่งโครงการที่มีลักษณะพิเศษ คือ บุคคลที่รับผิดชอบตรวจสอบแบบก่อสร้าง ควบคุมคุณภาพงานระหว่างก่อสร้าง และให้ความเห็นชอบผู้ว่าจ้างก่อนอนุมัตินั้นกระทำในนามของผู้รับจ้าง (โครงการที่ 1)

หากพิจารณาขอบเขตงานที่รับผิดชอบตามระบบการจัดทำและส่งมอบโครงการจากตารางที่ 4.3 พบว่า

- ระบบออกแบบ-ก่อสร้าง ผู้ที่เกี่ยวข้องภายในโครงการประกอบด้วยผู้ว่าจ้างซึ่งในบางโครงการรับผิดชอบงานออกแบบเบื้องต้นเอง ผู้รับจ้างรับผิดชอบงานออกแบบรายละเอียดดำเนินการก่อสร้าง และวิศวกรที่เป็นตัวแทนของผู้ว่าจ้างอาจจะเป็นวิศวกรที่ปรึกษารับผิดชอบคัดเลือกผู้รับจ้างและจัดเตรียมเอกสารสัญญาร่วมกับผู้ว่าจ้าง และควบคุมงานระหว่างก่อสร้าง หรือวิศวกรออกแบบและปรึกษาซึ่งรับผิดชอบทั้งงานออกแบบเบื้องต้น คัดเลือกผู้รับจ้างและจัดเตรียมเอกสารสัญญาร่วมกับผู้ว่าจ้าง และควบคุมงานระหว่างก่อสร้าง

- ระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้าง ผู้ที่เกี่ยวข้องภายในโครงการประกอบด้วยผู้ว่าจ้างซึ่งในบางโครงการทำหน้าที่ควบคุมงานระหว่างก่อสร้างด้วย ผู้รับจ้างรับผิดชอบดำเนินงานก่อสร้างเท่านั้น และตัวแทนผู้ว่าจ้าง ซึ่งอาจจะเป็นวิศวกรออกแบบรับผิดชอบงานออกแบบเบื้องต้น งานออกแบบรายละเอียด คัดเลือกผู้รับจ้างและจัดเตรียมเอกสารสัญญาร่วมกับผู้ว่าจ้าง หรือวิศวกรออกแบบและปรึกษามีหน้าที่รับผิดชอบเช่นเดียวกับวิศวกรออกแบบแต่รวมถึงการควบคุมงานระหว่างก่อสร้างด้วย

4.2.2 รูปแบบการเบิกจ่ายเงิน (Payment Methods)

เมื่อพิจารณารูปแบบการเบิกจ่ายเงินตามสัญญาของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ศึกษาทั้ง 5 โครงการพบว่ารูปแบบการเบิกจ่ายเงินที่ใช้มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ การจ่ายเงินแบบเหมาจ่าย (Lump Sum Payment) ใช้ใน 3 โครงการที่ศึกษา และการจ่ายเงินแบบราคาต่อหน่วย (Unit Price Payment) มีใช้ใน 2 โครงการที่ศึกษา

4.2.2.1 การจ่ายเงินแบบเหมาจ่าย (Lump Sum Payment)

การเบิกจ่ายเงินโดยวิธีนี้ได้มีการตกลงราคาทั้งหมดที่ผู้ว่าจ้างจะต้องจ่ายเพื่อการก่อสร้างตั้งแต่เริ่มต้นโครงการ ซึ่งราคานี้จะคงที่ตลอดถึงแม้ว่าราคาก่อสร้างจริงจะแตกต่างไปจากตอนที่ทำสัญญาก็ตาม นอกเสียจากมีระบุในสัญญาเกี่ยวกับการปรับราคา ดังนั้นการเสนอราคาจะรวมยอดทั้งค่าแรงงานและค่าวัสดุที่ใช้จนกระทั่งงานแล้วเสร็จ โดยผู้รับจ้างได้คิดรวมค่าดำเนินการและกำไรเอาไว้ด้วย ถ้าผู้ว่าจ้างประสงค์จะเปลี่ยนแปลงรูปแบบและรายการก่อสร้างหรือเพิ่มข้อกำหนดอื่นๆ ขึ้นมา จะต้องตกลงราคากันใหม่เฉพาะในส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปจากข้อกำหนดเดิม การจ่ายเงินนั้นจ่ายตามความก้าวหน้าของงานที่ทำได้จริงจนถึงวันที่มีการประเมินปริมาณงาน เช่น ปริมาณงานอุโมงค์วัดจากจำนวนวงหรือความยาวอุโมงค์ที่เจาะได้ หรือปริมาณดินขุดวัดจากความยาวอุโมงค์ที่ขุดได้คูณกับขนาดหน้าตัดอุโมงค์ เป็นต้น โดยระหว่างงวดจะจ่ายเงินตามงานที่ทำได้จริง แต่งวดสุดท้ายผู้ว่าจ้างจะจ่ายเงินส่วนที่เหลือให้ผู้รับจ้างทั้งหมด

จากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ศึกษาทั้ง 5 โครงการพบว่ามี 3 โครงการที่ใช้รูปแบบการเบิกจ่ายเงินแบบเหมาจ่าย คือ โครงการที่ 3 4 และ 5 ซึ่งโครงการที่ 3 และ 4 นั้นการจัดทำและส่งมอบโครงการเป็นระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้าง ส่วนโครงการที่ 5 เป็นระบบออกแบบ-ก่อสร้าง

4.2.2.2 การจ่ายเงินแบบราคาต่อหน่วย (Unit Price Payment)

ปกติแล้วรูปแบบการเบิกจ่ายเงินแบบราคาต่อหน่วยนี้เหมาะสมเฉพาะเมื่อปริมาณของวัสดุหรือปริมาณของการก่อสร้างไม่สามารถประมาณได้อย่างถูกต้องเมื่อตอนตกลงสัญญา จึงเป็นการยากที่จะกำหนดราคาเหมารวม ดังนั้นค่าก่อสร้างของผู้ว่าจ้างจึงไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับปริมาณที่ก่อสร้างจริง ดังเช่นโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ศึกษาทั้ง 2 โครงการ คือ โครงการที่ 1 และ 2 ซึ่งใช้รูปแบบการเบิกจ่ายเงินแบบนี้และมีรูปแบบการจัดทำและส่งมอบโครงการเป็นระบบออกแบบ-ก่อสร้าง ซึ่งเมื่อตอนตกลงทำสัญญาผู้ว่าจ้างยังไม่ทราบรายละเอียดของการก่อสร้างที่แน่นอน เช่น แนวของอุโมงค์ ความยาวของการขุดเจาะ และรายละเอียดชิ้นส่วนดาดผนังอุโมงค์ เป็นต้น ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงไปจากที่ทำสัญญาได้ตามการออกแบบของผู้รับจ้าง ฉะนั้นผู้ว่าจ้างจึงเลือกใช้รูปแบบการเบิกจ่ายเงินแบบราคาต่อหน่วย

โดยภายใต้สัญญาที่ใช้ภายในโครงการที่ศึกษาพบว่ารูปแบบการเบิกจ่ายเงินแบบราคาต่อหน่วยนั้นเป็นแบบมีเงื่อนไข ซึ่งมีกำหนดเงื่อนไขการจ่ายเงินตามขอบเขตปริมาณงาน เช่น ในกรณีที่ปริมาณงานที่ทำเสร็จจริงเกินกว่าที่กำหนดจะมีการปรับลดราคาต่อหน่วยลง หรือในกรณีที่ทำเสร็จจริงน้อยกว่าที่กำหนดจะจ่ายให้ตามราคาต่อหน่วยรวมทั้งมีการชดเชยค่าดำเนินการและค่าใช้จ่ายการเคลื่อนย้ายเข้าช่วงเริ่มงาน (Mobilization) ตามที่กำหนดไว้ในสัญญา นอกจากนี้มีระบุเงื่อนไขการจ่ายเงินให้ไม่เกินปริมาณที่ระบุไว้ในบัญชีแสดงปริมาณงาน (BOQ) สำหรับใช้ในกรณีที่

ปริมาณงานจริงเกินกว่าที่ระบุใน BOQ เพื่อควบคุมงบประมาณของผู้ว่าจ้างไม่ให้เกินจากที่คาดการณ์ไว้ ด้วยเหตุนี้ผู้รับจ้างจึงต้องรับผิดชอบส่วนที่เกินไปจาก BOQ

โดยสรุปแล้วการจ่ายเงินแบบราคาต่อหน่วยในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ศึกษา ผู้ว่าจ้างยังไม่ทราบราคาที่แท้จริงของโครงการจนกระทั่งงานก่อสร้างแล้วเสร็จ แต่จะทราบขอบเขตค่าก่อสร้างซึ่งไม่เกินปริมาณที่ระบุใน BOQ ส่วนการจ่ายเงินแบบเหมาจ่ายนั้นผู้ว่าจ้างทราบงบประมาณก่อสร้างของโครงการตั้งแต่ตกลงสัญญา (ยกเว้นกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงงาน) โดยการจ่ายเงินงวดสุดท้ายแบบเหมาจ่ายผู้รับจ้างจะได้รับส่วนที่เหลือของราคาตามสัญญาจากงวดที่ผ่านมาทั้งหมด ส่วนการจ่ายเงินแบบราคาต่อหน่วยนั้นก่อนการจ่ายเงินงวดสุดท้ายจะต้องมีการตรวจวัดปริมาณที่ก่อสร้างจริงให้แน่นอน

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการจัดทำและส่งมอบโครงการและรูปแบบการเบิกจ่าย

รูปแบบการจัดทำและส่งมอบโครงการ	รูปแบบการเบิกจ่ายเงิน	
	แบบเหมาจ่าย (Lump Sum)	แบบราคาต่อหน่วย (Unit Price)
ระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้าง (D-B-B)	3,4	
ระบบออกแบบ-ก่อสร้าง (D-B)	5	1,2

หมายเหตุ

1 = โครงการที่ 1
2 = โครงการที่ 2
3 = โครงการที่ 3
4 = โครงการที่ 4
5 = โครงการที่ 5

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาจากรูปแบบการจัดทำและส่งมอบโครงการจะเห็นได้ว่าโครงการที่เป็นระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้างทั้ง 2 โครงการ คือ โครงการที่ 3 และ 4 ใช้รูปแบบการจ่ายเงินแบบเหมาจ่าย ส่วนโครงการที่เป็นระบบออกแบบ-ก่อสร้างมีใช้ทั้งรูปแบบการจ่ายเงินแบบเหมาจ่าย คือ โครงการที่ 5 และแบบราคาต่อหน่วย คือ โครงการที่ 1 และ 2

หากพิจารณาจากรูปแบบการเบิกจ่ายเงินพบว่าการจ่ายเงินแบบราคาต่อหน่วยนั้นใช้ในโครงการที่รูปแบบการจัดทำและส่งมอบโครงการเป็นระบบออกแบบ-ก่อสร้าง คือ โครงการที่ 1 และ 2 ส่วนการจ่ายเงินแบบเหมาจ่ายนั้นมีใช้ทั้งในโครงการที่รูปแบบการจัดทำและส่งมอบโครงการเป็นระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้าง คือ โครงการที่ 3 และ 4 และในโครงการที่เป็นระบบออกแบบ-ก่อสร้าง คือ โครงการที่ 5

4.3 สรุปท้ายบท

การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยเครื่องขุดเจาะระบบสมดุลแรงดันดินเป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ประกอบกับคุณสมบัติต่างๆ ที่เหมาะสมทำให้หัวเจาะอุโมงค์ระบบสมดุลแรงดันดินถูกคัดเลือกมาใช้ หลักการทำงานของเครื่องขุดเจาะระบบสมดุลแรงดันดินนั้นใช้แรงดันจากการขุดเจาะเป็นตัวเพิ่มเสถียรภาพของดินบริเวณด้านหน้าหัวเจาะไม่ให้พังทลาย โดยควบคุมแรงดันดินด้านหน้าและในห้องพักดินให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันดินธรรมชาติและแรงดันน้ำใต้ดินที่หน้าหัวเจาะให้เกิดความสมดุล พร้อมทั้งควบคุมปริมาณดินที่ขุดเจาะให้เท่ากับปริมาณดินที่ปล่อยออก

การขุดเจาะอุโมงค์ด้วยเครื่องขุดเจาะระบบสมดุลแรงดันดินประกอบด้วยงานหลักๆ 4 ส่วน คือ 1) งานขนส่งและติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ 2) งานขุดเจาะอุโมงค์ แบ่งออกเป็น การขุดเจาะช่วงเริ่มแรกและการขุดเจาะอุโมงค์หลัก ซึ่งแต่ละช่วงจะดำเนินงานเป็นรอบ คือ ขุดเจาะ ฉีดน้ำปูน ขนย้ายดิน ติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ และตรวจสอบตำแหน่งและทิศทางของหัวเจาะ 3) งานอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ ประกอบด้วย Primary Grouting และ Secondary Grouting และ 4) งานขนย้ายและลำเลียงดิน โดยใช้ขบวนรถจักรลากจูง

โครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยเครื่องขุดเจาะในงานวิจัยนี้มี 5 โครงการ ได้แก่ โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำ ของสำนักการระบายน้ำ สังกัดกรุงเทพมหานคร โครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ ของการประปานครหลวง และโครงการก่อสร้างอุโมงค์สายส่งไฟฟ้า ของการไฟฟ้านครหลวง จากทั้ง 5 โครงการ เมื่อพิจารณารูปแบบของระบบการจัดทำและส่งมอบโครงการพบว่ามี 2 รูปแบบ คือ ระบบออกแบบ-ประมูล-ก่อสร้าง หรือ Design-Bid-Build มีใช้ใน 2 โครงการ และระบบออกแบบ-ก่อสร้าง หรือ Design-Build มีใช้ใน 3 โครงการ สำหรับรูปแบบการเบิกจ่ายเงินของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ศึกษาพบว่ามีใช้อยู่ 2 รูปแบบ คือ การจ่ายเงินแบบเหมาจ่าย หรือ Lump Sum Payment ซึ่งใช้ใน 3 โครงการ และการจ่ายเงินแบบราคาต่อหน่วย หรือ Unit Price Payment มีใช้ใน 2 โครงการ โดยการจ่ายเงินแบบราคาต่อหน่วยผู้ว่าจ้างนั้นยังไม่ทราบราคาที่แท้จริงของโครงการจนกระทั่งงานก่อสร้างแล้วเสร็จ ส่วนการจ่ายเงินแบบเหมาจ่ายผู้ว่าจ้างจะทราบงบประมาณก่อสร้างของโครงการตั้งแต่ตอนตกลงสัญญา

จากการศึกษาวิธีการก่อสร้างและรายละเอียดของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยเครื่องขุดเจาะกรณีศึกษาที่กล่าวถึงในบทนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบกระบวนการก่อสร้างและการดำเนินงานของโครงการ สำหรับนำไปใช้ในการระบุปัจจัยเสี่ยงที่มีโอกาสเกิดขึ้นและสำหรับการเสนอแนวทางการจัดสรรความเสี่ยงและแนวทางการปรับปรุงเนื้อหาสัญญาจ้างก่อสร้างให้เหมาะสมกับกระบวนการก่อสร้างและเหมาะสมกับแต่ละรูปแบบโครงการต่อไป